

4. Verkkokerros

- **sovelluskerros**
 - ‘asiakas’
- **kuljetuskerros**
 - ‘end-to-end’
- **verkkokerros**
 - ‘deliver packets given to it by its customers’
- **siirtoyhteyskerros**
- **peruskerros**

Verkkokerroksen palvelut

- **tavoitteet**
 - palvelut riippumattomia aliverkkojen tekniikasta
 - kuljetuskerros eristettävä aliverkkojen ominaisuuksista
 - lukumäärä
 - tyypit
 - topologia
 - kuljetuskerroksen käyttämät **verkko-osoitteet globaaleja**

connection-oriented ~ connectionless

- **yhteydetön (Internet, 30 vuoden kokemus)**
 - aliverkot ovat luonnostaan epäluotettavia
 - tehtävä: bittien kuljetus
 - operaatiot: send packet, receive packet
 - virheen tarkistus, vuonvalvonta isäntäkoneille
- **yhteydellinen (puhelin 100 vuoden kokemus)**
 - muodostetaan yhteys, neuvotellaan parametrit (palvelunlaatu (QOS), kustannus)
 - kaksisuuntainen kuljetus, paketit järjestyksessä
 - vuonvalvonta, virhevalvonta

Virtuaalipiiri (virtual circuit)

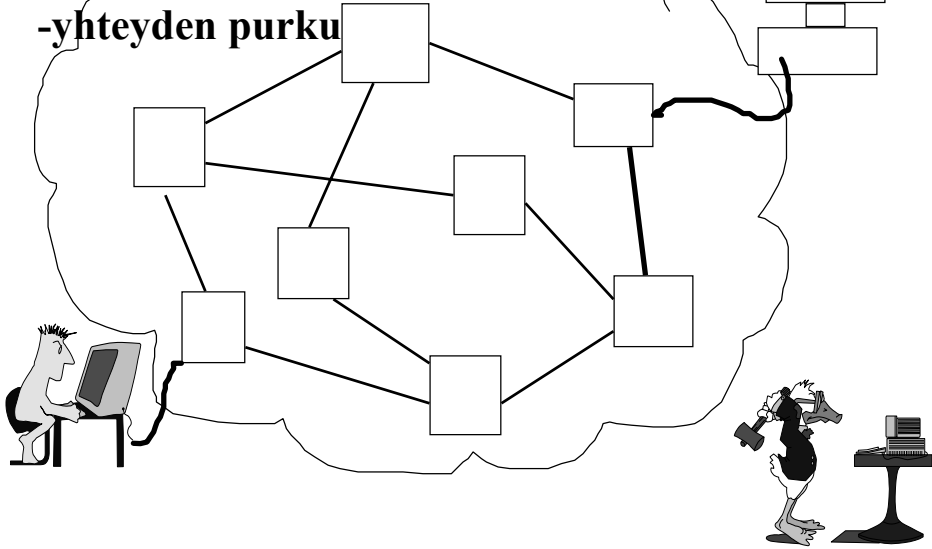
- **Pakettikytkentäinen verkko voidaan toteuttaa kahdella tavalla**
 - datasähkeverkkona
 - jokainen paketti käsitellään ja reititetään erikseen
 - pakettien järjestys voi muuttua
 - virtuaalipiiriverkkona
 - ~ piirikytkentäinen verkko
 - ensin yhteyden (virtuaalipiirin) muodostus
 - sitten pakettien lähettäminen yhteyttä pitkin
 - ATM, X.25

Piirikytkentäinen verkko

- ensin yhteyden muodostus

- sitten datan siirto yhteyttä pitkin

- yhteyden purku



4.1. Verkkokerroksen tärkein tehtävä: reititys

- **(hajautettu) päätöksenteko reitistä**
 - yhteydellinen: alussa
 - yhteydetön: jatkuvasti
- **jatkuvaa muutosta verkossa**
 - rikkoutuvat komponentit, muuttuva topologia
- **ristiriitaisia vaatimuksia reititykselle**
 - optimaalisuus /reiluus (fairness)
- **reitityksen suorituskyky**
 - mean packet delay, network throughput

Reititysalgoritmi

- **Päättää, mikä reitti valitaan**
 - mihin paketti ohjataan seuraavaksi
- **dynaaminen verkkoympäristö => dynaaminen reititys**
 - jatkuvaan verkon tarkkailuun perustuva
 - Internetin reititys
 - muuttumaton ympäristö => käytetään kerran laskettuja reittejä tai sovittua lähetystapaa
 - tulvitus (flooding)
 - Dijkstran algoritmilla lasketut lyhyimmät reitit

Tulvitus

- jokainen saapunut paketti lähetetään kaikille muille ulosmenoille
 - => verkko täyttyy pian paketeista
- eri tapoja tulvituksen lopettamiseen
 - käsitellään harjoituksissa
- käyttö
 - tietyissä erityistilanteissa tilanteissa hyödyllinen
 - käsitellään harjoituksissa

Dijkstran algoritmi

- **'lyhyin' reitti yhdestä solmusta muihin**
 - $A \rightarrow \{\text{muut solmut}\}$
- **kaariin liittyy kustannus**
 - kapasiteetti (bps)
 - viive: hyppyjä, aikaa
 - raha
 - virhetodennäköisyys

2/5/2003

9

• Algoritmi

- merkitään $D(v)$ on tähän asti tutkituista reiteistä lähtösolmusta A solmuun v halvin kustannus eli lyhyin pituus
- verkko $G = (V, E)$, V on solmujen joukko, E kaarten joukko
- olkoon $c(i,j)$ on kaaren (i,j) kustannus (≥ 0). Jos kaarta ei ole, $d(i,j)$ on ääretön
 - algoritmissa oletetaan, että kaikki kustannukset ovat ei-negatiivisiä

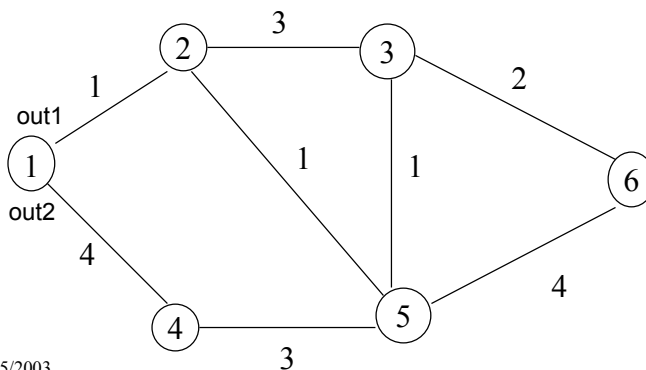
2/5/2003

10

1. $N := \{1\}; D(1) := 0; D(j) := d(j,1) \ (j \neq 1);$
2. while $N \neq V$ do
3. etsi solmu w , joka ei vielä ole joukossa N ja jonka $D(w)$ on pienin N :ään kuulumattomista solmuista
4. $N := N \cup \{w\}$
5. kaikille muille N :ään kuulumattomille solmuille $v \ D(v) := \min\{D(v), D(w) + c(w,v)\}$
6. end while
7. end

Esimerkki

- Tarkastellaan esimerkkinä verkkoa



1. $N = \{1\}$; $D(1) := 0$; $D(2) := 1$;
 $D(3) := \text{ääretön}$, $D(4) := 4$; $D(5) := \text{ääretön}$,
 $D(6) := \text{ääretön}$

3. pienin $D(v)$ on solmulla 2 (=1)

4. $N = \{1, 2\}$

5. $D(3) := 1 + 3 = 4$, $D(4) = 4$, $D(5) := 1 + 1 = 2$,
 $D(6) = \text{ääretön}$

3. pienin $D(v)$ on nyt solmulla 5 (=2)

4. $N = \{1, 2, 5\}$

5. $D(3) := 1 + 2 = 3$, $D(4) := 4$, $D(6) := 4 + 2 = 6$

3. pienin $D(v)$ solmulla 3 (=3)

4. $N = \{1, 2, 3, 5\}$

5. $D(4) := 4$, $D(6) := 2 + 3 = 5$;

3. Pienin $D(v)$ solmulla 4 (=4)

4. $N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$

5. $D(6) := 5$

4. $N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

Löydetyt reitit ja kustannukset

- **1-> 2 :1**
- **1-> 2->5->3: 3**
- **1-> 4: 4**
- **1->2->5: 2**
- **1->2->5->3->6: 5**

| Solmu | linkki | kustann. |
|-------|--------|----------|
| 2 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 3 |
| 4 | 2 | 4 |
| 5 | 1 | 2 |
| 6 | 1 | 5 |

Solmulle 1

Reititystaulu

- **Kukin reititin pitää kirjaa reittitiedoista**
 - minne paketti seuraavaksi lähetetään

| Kohde | minne lähetetään |
|-------|------------------------|
| Abc | reititin D, ulosmeno 2 |
| ... | |
| Xyz | reititin T, ulosmeno 3 |

- **reitittimien tietojen hankinta ja ylläpito?**
 - erityisen nopeasti muuttuvassa hyvin isossa verkossa

Reititystietojen keruu

- kukin reititin kerää ‘kustannustietoja’ omasta ympäristöstään
 - esim. viiveet naapurireitittimiin
- ja vaihtaa tietoja muiden reitittimien kanssa
 - tai lähettää tiedot reitittimelle, joka keskitetysti laskee parhaat reitit
- kukin laskee esim. Dijkstran algoritmilla parhaat reitit koko verkosta
 - tai saa tarvitsemansa reititystiedot ne laskeneelta

2/5/2003

17

Etäisyysvektoreititys (distance vector)

- **Arpanetin alkuperäinen reititys**
 - vieläkin RIP jonkin verran käytössä Internetissä
- **kullakin reitittimellä reititystaulu**
 - kullekin verkon reitittimelle
 - ulosmenolinja
 - aika/etäisyys kohteeseen
 - hyppyjen lkm
 - arvioitu viive
 - jononpituus
 - jokin mitattavissa oleva

2/5/2003

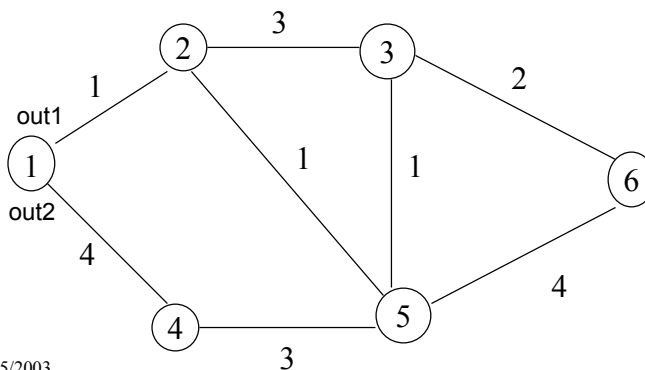
18

reititystaulun ylläpito

- **tietojen vaihto naapurireitittimien kanssa**
 - tietyin aikavälein
 - tilan vaihtuessa
- **lasketaan uudet reittitaulut ('etäisyystaulut')**
 - 'kustannus' naapuriin +
naapurin ilmoittama 'kustannus' kohteeseen
 - kullekin solmulle valitaan pienimmän 'kustannuksen' reitti

Esimerkki

- **Tarkastellaan esimerkkinä verkkoa**



Solmun 3 reititystaulu

| | 3 | 2 | 5 | 6 | |
|---|---|------|------|------|----------|
| 1 | - | 1(2) | | | => 4 (2) |
| 2 | 3 | | 1(5) | | => 2 (5) |
| 4 | - | | 3(5) | | => 4 (5) |
| 5 | 1 | 1(2) | | 4(6) | => 1(5) |
| 6 | 2 | | 4(5) | | => 2 (6) |

2/5/2003

21

Ongelma: tietojen muuttumisnopeus

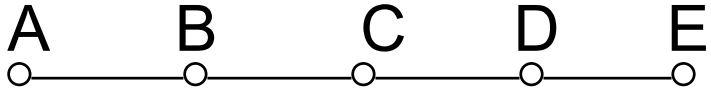
- **tietojen muuttamiseen kuluu aikaa**
- **reagoi melko nopeasti hyviin uutisiin**
 - uusi nopea reitti löytynyt/linkki jälleen pystyssä
 - tieto etenee joka vaihdossa yhden hypyn
- **reagoi hitaasti huonoihin uutisiin**
 - linkki nurin => etäisyys ääretön
 - joka vaihdossa ‘paras arvio’ huononee yhdellä
 - **count - to - infinity** -ongelma

2/5/2003

22

o
o
o

Hyvät uutiset etenevät nopeasti:



Aluksi yhteys A:han on poikki ja sitten linkki AB toimii taas:

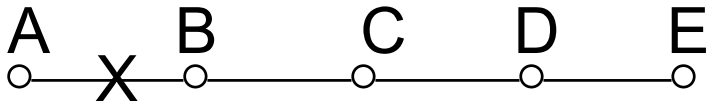
| | B | C | D | E |
|---|---------|---------|---------|---------|
| | ääretön | ääretön | ääretön | ääretön |
| 1 | ääretön | ääretön | ääretön | ääretön |
| 1 | 2 | ääretön | ääretön | ääretön |
| 1 | 2 | 3 | ääretön | ääretön |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 23 |

2/5/2003

o o o o o o o o

o
o
o

Huonot uutiset etenevät hitaasti:



Toimiva linkki katkeaa välillä AB:

| | B | C | D | E |
|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 3 | 2 | 3 | 4 | |
| 3 | 4 | 3 | 4 | |
| 5 | 4 | 5 | 4 | |
| 5 | 6 | 5 | 6 | |
| 7 | 6 | 7 | 6 | |
| 7 | 8 | 7 | 8 | 24 |

2/5/2003

o o o o o o o o

Poisoned reverse (Split horizon)

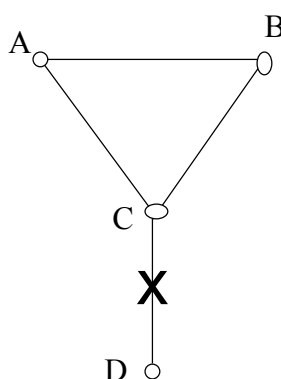
- **ratkaisu 'count -to-infinity'-ongelmaan**

- reititystietoja vaihdettaessa
 - ilmoitetaan etäisyys reitittimeen X äärettömäksi sille naapurille, jonka kautta tämä reitti kulkee
 - muille kerrotaan oikea etäisyys
- **tieto etenee yhden hypyn joka vaihdolla!**

2/5/2003

25

- **ratkaisu ei toimi aina**



Linkki CD katkeaa,
A ja B ilmoittavat C:lle
ettei D:hen pääse

C päättelee, että D:tä ei
voi saavuttaa

Kuitenkin A kuulee B:ltä,
että sillä on etäisyys 2
D:hen => oma etäisyys 3

2/5/2003

26

Linkkitilareititys (Link State Routing)

- **reitittimen tehtävät**

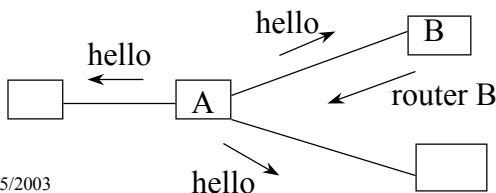
- selvitettävä naapurit ja niiden osoitteet
- mitattava etäisyys / kustannus naapureihin
- koottava tietopaketti ko. tiedoista
- lähetettävä tietopaketti kaikille reitittimille
- laskettava lyhin reitti kaikkiin muihin reitittämiin esim. Dijkstran algoritmilla

2/5/2003

27

Naapurien löytäminen

- reititin lähettää jokaiseen kaksipisteyhteyteen HELLO-paketin
- linjan toisessa päässä oleva reititin vastaa ja lähettää nimensä
 - router ID
 - nimien oltava yksikäsitteisiä koko verkossa



2/5/2003

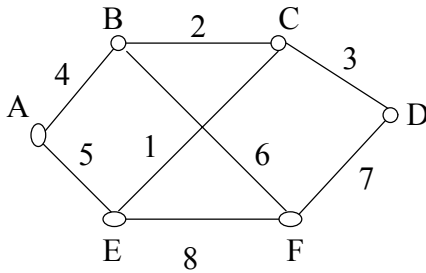
28

Etäisyyden mittaaminen

- **kaikille naapureille ECHO-paketti**
 - vastaanottajan palautettava paketti välittömästi
- **=> kiertoviive (round-trip-time)**
 - dynaaminen etäisyysmitta
- **pitäisikö ottaa kuormitus huomioon?**
 - kello käynnistetään , kun paketti viedään jonoon
 - kello käynnistetään, kun paketti lähtee
 - kuormitus mukana kuvaa todellista tilannetta
 - jos kuormitus mukana => reititys muuttaa kuormitusta
=> reititys suosii huonoa reittiä

Tietopakettien kokoaminen

- **muodostus**
 - tietyin aikavälein
 - kun muutoksia havaittu
- **sisältö**
 - reitittimen tunnus
 - paketin järjestysnumero
 - paketin ikä
 - ‘etäisyydet’ kuhunkin reitittimen naapuriin
 - Erilaisia etäisyysmittoja => eri reittejä eri liikenteelle



| | |
|-----|---|
| B | |
| seq | |
| age | |
| A | 4 |
| C | 2 |
| F | 6 |

Tietopaketin jakelu

- **käytetään tulvitusta** (n. 10 minuutin välein)
 - **pidetään kirjaa jo nähdystä paketeista**
 - reititin A, paketti 145
 - => paketti lähetetään korkeintaan kerran
 - paketissa elinaikalaskuri (age, time-to-live)
 - väärät ja vanhentuneet tiedot katoavat aikanaan, vaikka reititin itse olisikin vikaantunut
- **tietopaketit kuitataan**
 - linjavirheiden takia
- **autentikointi paketteja vaihdettaessa**

Miksi elinaikalaskuri on tarpeen?

- **virheellinen järjestysnumero**

- kaatunut reititin aloittaa väärästä numerosta

- edennyt jo pakettiin 204 ja aloittaa uudestaan paketista 0 => kaikki seuraavat paketit hylätään duplikaatteina pakettiin 205 saakka

- virhe tietopaketin seq-kentässä

- 4 muuttuu virheellisesti 65540:ksi => seuraavat paketit hylätään pakettiin 65541 saakka

elinaikalaskuri (TTL-laskuri)

- **laskuri vähenee ajan kuluessa**

- vähenee yhdellä sekunnin välein

- **paketti tuhotaan, kun laskuri = 0**

- vanhentunut (virheellinen) tieto poistetaan

- pitkäkö elinaika >> päivitysten väli

- tuhotaan vain jos reititin kaatunut
- usea (6) paketti on jäänyt saapumatta reitittimeltä

- **käytössä myös tulvituksessa**

- kukin reititin vähentää yhdellä

Lisäparannuksia

- **paketteja ei lähetetä välittömästi eteenpäin**
 - ne jätetään odottamaan
 - jos samalta reitittimeltä tulee muita paketteja, niistä valitaan vain yksi, tuorein edelleenlähetettäväksi

Reittitaulun laskeminen

- **kukin reitin laskee omat reittitaulunsa**
- **kaikki tarvittava tieto on saatu tietopakettien avulla**
 - kukin linkki molempiin suuntiin
- **laskeminen Dijkstran algoritmilla**
 - lyhyin reitti kuhunkin muuhun reitittimeen
 - isoissa verkoissa voi olla muisti- ja laskenta-aikaongelmia

ongelmia

- **väärin toimiva reititin**
 - kertoo väärää tietoa
 - ei välitä tietopaketteja
 - väärentää tietopaketteja
 - laskee reitit väärin
- **isossa verkossa aina joku toimii väärin**
 - tavoitteena rajata ongelmat pienelle alueelle

Käyttö

- **paljon käytetty nykyisissä verkoissa**
 - Internetin OSPF-protokolla
 - ISO:n IS-IS -protokolla

Hierarkkinen reititys

- **reitityksen skaalautuvuus**
 - isossa verkossa runsaasti reitittimiä (Internet: miljoonia)
 - reititystaulut suuria
 - reittien laskeminen raskasta
 - tietopaketit kuluttavat linjakapasiteettia
- **hallinta-autonomia => autonominen järjestelmä AS**
 - organisaatio päättää omista asioistaan
 - myös reitityksestä
 - oma sisäinen reititystapa

Reitityshierarkia

- **Ylimmällä tasolla AS**
 - sama reititys AS:n sisällä
 - tehokkuus tärkeää
 - reititys AS:ien välillä
 - ‘poliittinen asia’
- **AS:n sisällä alueita**
 - jaetaan reitittimet ryhmiin (alueet, regions)
 - kukin reititin tuntee kaikki alueensa sisällä
 - tietää mikä reititin hoitaa liikenteen muihin alueisiin

Hierarkkisen reitityksen ongelmat

- **reititin pituus kasvaa**
 - aina ei voida käyttää optimaalista reittiä
 - yleensä siedettävä
- **hierarkiatasojen määrä**
 - suorituskyky
 - hallinto

4.2. Reititin (Router)

